

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 28.08.2023 16:08:01

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf754943df4a4851fda56d089

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
О.Г. Локтионова
« 8 » 08 2023 г.

ФОРМИРОВАНИЕ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ С ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Методические указания
по выполнению лабораторной работы
для студентов, обучающихся по направлению подготовки
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
по дисциплине «Общая теория связи»

Курск 2023

УДК 621.391 (075)

Составители: Д.С. Коптев

Рецензент

Доктор технических наук, старший научный сотрудник,
заведующий кафедрой космического приборостроения и систем связи
В. Г. Андронов

Формирование и детектирование сигналов с частотной модуляцией: методические указания по выполнению лабораторной работы / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Д.С. Коптев. Курск, 2023. – 21 с.

Методические указания по выполнению лабораторной работы содержат краткие теоретические сведения о формировании и детектировании сигналов с частотной модуляцией, лабораторной установке и порядке выполнения лабораторной работы.

Методические указания соответствуют учебному плану по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», а также рабочей программе дисциплины «Общая теория связи».

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 08.08.2023. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л. 1,22. Уч.-изд. л. 1,1. Тираж 100 экз. Заказ 711. Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

1 Цель работы

- экспериментальное исследование принципа действия частотного модулятора и частотного детектора. Получение характеристик частотного модулятора при воздействии на его вход моногармонического сигнала. Исследование формы и спектра сигналов с частотной модуляцией. Выбор оптимального режима детектирования.

2 Краткая характеристика исследуемых цепей и сигналов

В данной работе используется универсальный лабораторный стенд со сменным блоком ЧАСТОТНЫЙ МОДЕМ, упрощённая принципиальная схема которого приведена на рисунке 1.

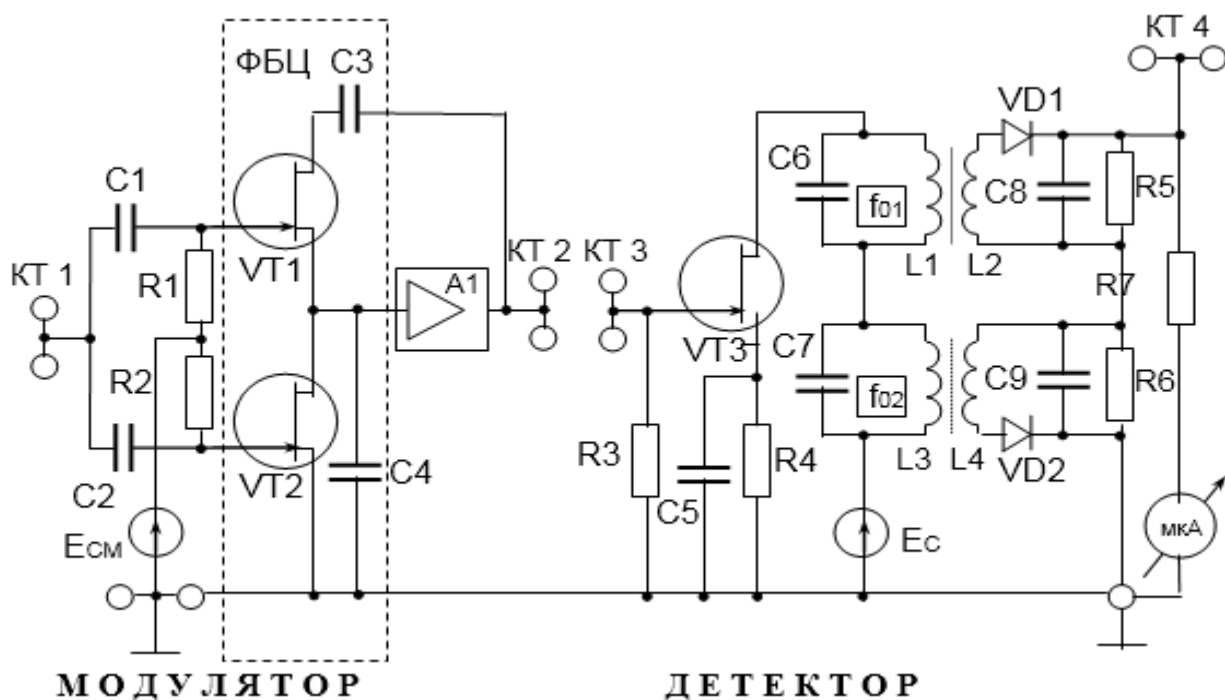


Рисунок 1 – Схема блока ЧАСТОТНЫЙ МОДЕМ

Исследуемый частотный модулятор представляет собой RC генератор, состоящий из двухкаскадного резистивного усилителя (A1) и фазобалансной цепи (ФБЦ), обеспечивающей положительную обратную связь. Частота генерации зависит от параметров ФБЦ – ёмкостей C3, C4 и сопротивлений каналов ($R_{си}$) полевых транзисторов VT1 и VT2. Сопротивление канала ($R_{си}$) зависит от управляющего напряжения, приложенного к затвору. Таким образом, полевой транзистор в ФБЦ является параметрическим элементом, управляемым

модулирующим напряжением. Напряжение смещения ($E_{см}$), являющееся постоянной составляющей модулирующего сигнала, позволяет установить несущую частоту модулированного сигнала, а переменная составляющая, т.е. сам модулирующий сигнал, поданный на гнезда КТ1, обеспечивает девиацию частоты Δf_{max} , зависящую от амплитуды модулирующего сигнала. Выходом частотного модулятора являются гнезда КТ2.

В схеме модулятора имеется блок автоматической регулировки усиления, поддерживающий постоянную амплитуду ЧМ сигнала (на схеме не показан).

Схема частотного детектора состоит из усилителя на полевом транзисторе VT3, в нагрузку которого включены два резонансных контура, настроенных на разные частоты (f_{01} и f_{02}). Эти частоты расположены симметрично относительно несущей частоты ЧМ сигнала. Ток ЧМ сигнала с постоянной амплитудой, протекая через два расстроенных контура, вызывает на них падения напряжения, пропорциональные их сопротивлениям. Чем ближе мгновенная частота ЧМ сигнала к резонансной частоте контура, тем больше амплитуда напряжения на контуре и наоборот. Таким образом, линейная цепь (рассмотренный колебательный контур) преобразует ЧМ сигнал в сигнал, в котором и амплитуда, и частота меняются одновременно. Осциллограмма такого сигнала внешне очень похожа на АМ сигнал, но частота заполнения его меняется так же, как у входного ЧМ сигнала. Нагрузкой каждого контура является свой детектор огибающей (АМ детектор).

Выходные напряжения АМ детекторов (на резисторах R5 и R6) зависят от расстройки контуров относительно мгновенной частоты ЧМ сигнала. Для идеальной работы ЧМ детектора модуль полного сопротивления расстроенного контура должен меняться прямо пропорционально девиации частоты ЧМ сигнала. Однако на частотной характеристике контура имеется небольшой почти линейный участок в районе точки перегиба. Для увеличения ширины линейного участка характеристики детектирования применяют не один, а два симметрично расстроенных контура. Встречное включение диода (VD2) во втором детекторе огибающей позволяет в значительной степени компенсировать нелинейность склона АЧХ контура, а также компенсировать постоянную составляющую выходного сигнала.

Выходное напряжение ЧМ детектора (гнездо КТ3) равно разности напряжений на выходах АМ детекторов:

$$U_{\text{вых}} = U_{R5} - U_{R6}.$$

Выход частотного модулятора (гнездо КТ2 на рисунке 1) соединяется переключкой со входом частотного детектора (гнездо КТ3). Выход частотного детектора (гнездо КТ4) соединен с микроамперметром, измеряющим постоянную составляющую тока детектора.

В качестве источника модулирующего сигнала используется встроенный диапазонный генератор, подключенный ко входу модулятора. В качестве источника ЧМ сигнала используется частотный модулятор, выход которого (гнездо КТ2 на рисунке 1) соединяется переключкой со входом частотного детектора (гнездо КТ3). Для контроля входного сигнала используется встроенный вольтметр или осциллограф. Анализ спектра производится на ПК в режиме «Спектроанализатор».

3 Домашнее задание

3.1 Изучите основные вопросы по конспекту лекций и литературе:

- Бабанин И.Г., Коптев Д.С. Общая теория связи. Сигналы и аналоговые системы передачи информации: учеб. пособие / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2018. – 110 с.

- Коптев Д.С., Бабанин И.Г., Довбня В.Г. Теория радиотехнических сигналов: учеб. пособие / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2019. – 240 с.

Оформите заготовку отчета. Выполните необходимые расчёты.

4 Основы теории

4.1 Угловая модуляция

Для описания модулированных колебаний удобно использовать квазигармоническую форму:

$$u(t) = U_0(t) \cos \Phi(t), \quad (1)$$

где $\Phi(t) = \omega_0 t + \Delta\varphi(t) + \varphi_0$ – текущая фаза; $\Delta\varphi(t)$ – девиация (отклонение) фазы; φ_0 – начальная фаза.

При угловой модуляции (УМ) огибающая $U_0(t)$ не изменяется $U_0(t) = \text{const}$, а изменению подвергается либо фаза, либо её производная.

Фазовая модуляция (ФМ) – вид модуляции, при которой девиация фазы пропорциональна модулирующему сигналу $u_c(t)$:

$$\Delta\varphi(t) = K_{\text{ФМ}} u_c(t), \quad (2)$$

где $K_{\text{ФМ}}$ – константа, характеризующая работу модулятора.

Для частного случая – тональной ФМ, когда в качестве модулирующего сигнала используется гармонический сигнал низкой частоты ($\Omega \ll \omega_0$):

$$u_c(t) = U_c \cos \Omega t,$$

девиация фазы согласно (2) равна:

$$\Delta\varphi(t) = K_{\text{ФМ}} U_c \cos \Omega t = M_{\text{ФМ}} \cos \Omega t, \quad (3)$$

где $M_{\text{ФМ}} = K_{\text{ФМ}} U_c = \Delta\varphi_{\text{max}}$ – индекс фазовой модуляции, имеющий смысл максимальной девиации фазы. Подставив (3) в (1), получим выражение для тональной ФМ:

$$u_{\text{ФМ}}(t) = U_0 \cos[\omega_0 t + M_{\text{ФМ}} \cos \Omega t],$$

(в этом выражении и далее полагается $\varphi_0 = 0$).

Частотная модуляция (ЧМ) – вид модуляции, при котором девиация частоты пропорциональна модулирующему сигналу:

$$\Delta\omega(t) = K_{\text{ЧМ}} u_c(t),$$

где $K_{\text{ЧМ}}$ – константа, характеризующая работу модулятора.

Производная от текущей фазы равна мгновенной частоте сигнала $\omega(t)$:

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} \Phi(t) = \omega_0 + \frac{d}{dt} [\Delta\varphi(t)] = \omega_0 + \Delta\omega(t),$$

равной сумме несущей частоты ω_0 и девиации частоты $\Delta\omega(t)$, изменяющейся под управлением модулирующего сигнала. В каждый момент времени мгновенная частота сигнала имеет только одно значение, в то время как спектр сигнала может состоять из большого числа частотных составляющих.

В частном случае тональной ЧМ:

$$u_c(t) = U_c \cos \Omega t, \quad \Delta\omega(t) = K_{\text{ЧМ}} U_c \cos \Omega t = \Delta\omega_{\text{max}} \cos \Omega t,$$

мгновенная частота равна:

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega_{\text{max}} \cos \Omega t,$$

а полная фаза:

$$\begin{aligned} \Phi(t) &= \int_0^t \omega(\tau) d\tau = \int_0^t \omega_0 d\tau + \int_0^t \Delta\omega_{\text{max}} \cos \Omega \tau d\tau = \\ &= \omega_0 t + \frac{\Delta\omega_{\text{max}}}{\Omega} \sin \Omega t = \omega_0 t + M_{\text{ЧМ}} \sin \Omega t. \end{aligned}$$

Здесь $M_{\text{ЧМ}} = \Delta\omega_{\text{max}}/\Omega$ – индекс ЧМ, имеющий смысл максимальной девиации частоты. Подставив последнее выражение в (1), получим:

$$u_{\text{ЧМ}}(t) = U_0 \cos[\omega_0 t + M_{\text{ЧМ}} \sin \Omega t].$$

4.2 Спектры ФМ и ЧМ сигналов

Из сопоставления выражений для тональных ФМ и ЧМ следует, что они отличаются только начальной фазой, что даёт основание рассматривать их как одно общее колебание с УМ:

$$u_{\text{УМ}}(t) = U_0 \cos[\omega_0 t + M_{\text{УМ}} \sin \Omega t].$$

Представим это выражение в комплексной форме (аналитический сигнал):

$$\dot{u}_{\text{УМ}}(t) = U_0 e^{j[\omega_0 t + M_{\text{УМ}} \sin \Omega t]} = U_0 e^{j\omega_0 t} \cdot e^{jM_{\text{УМ}} \sin \Omega t}. \quad (4)$$

Последний множитель в этом выражении является периодической функцией времени. Разложим его в ряд Фурье:

$$e^{jM \sin \Omega t} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(M) e^{jk\Omega t}. \quad (5)$$

Коэффициентами разложения являются функции Бесселя первого рода k -го порядка от индекса модуляции M (рисунок 2).

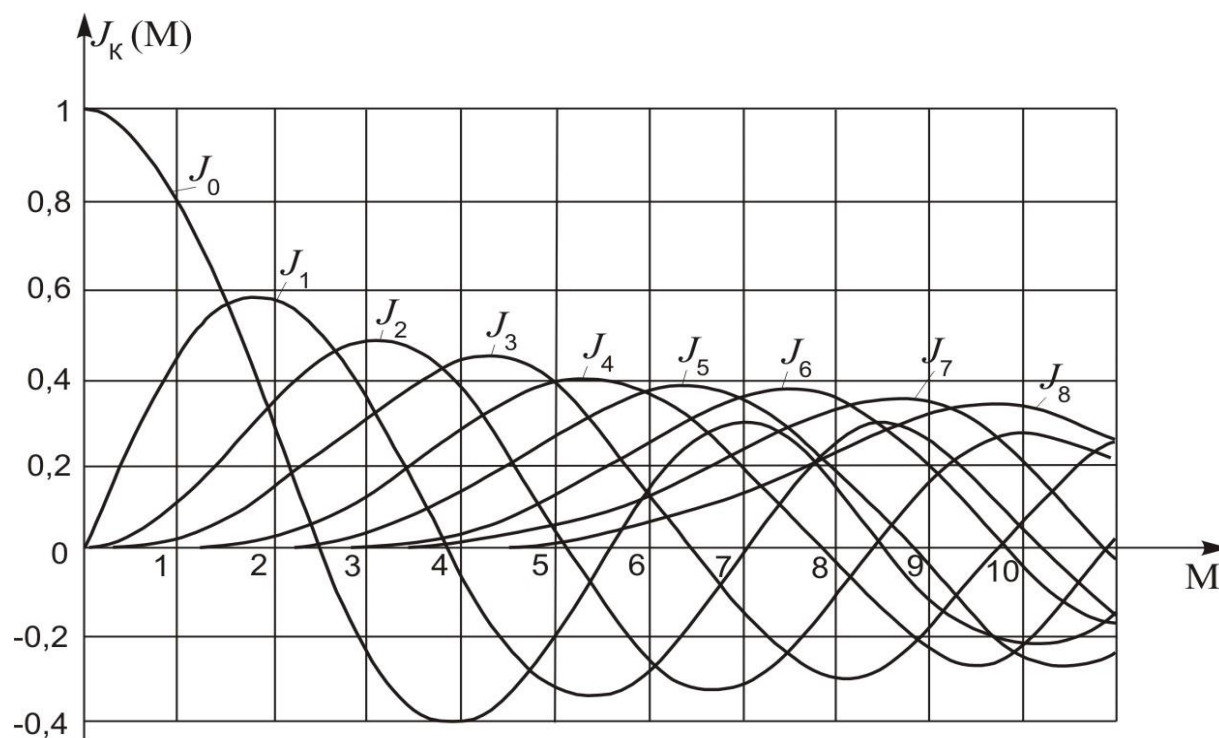


Рисунок 2 – Функция Бесселя для $M \geq 0$.

Подставив (5) в (4), получим:

$$\dot{u}_{\text{УМ}}(t) = U_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(M_{\text{ЧМ}}) e^{j[\omega_0 + k\Omega]t}.$$

Взяв вещественную часть от этого выражения, перейдем от комплексной записи к канонической форме квазигармонического колебания:

$$u_{\text{УМ}}(t) = U_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(M_{\text{УМ}}) \cos(\omega_0 + k\Omega)t.$$

Из этого выражения видно, что спектр амплитуд модулированного колебания состоит из бесконечного числа спектральных линий, расположенных на частотной оси с равномерным шагом Ω . Амплитуды спектральных линий определяются произведением амплитуды модулированного колебания U_0 на соответствующие значения функции Бесселя — $U_0 J_k(M)$. Но так как максимальное значение функции

Бесселя равно единице (J_0 при $M = 0$), то значения $J_k(M)$ могут рассматриваться как относительные амплитуды спектральных составляющих.

Практическая ширина спектра сигнала с УМ ограничивается составляющими с относительной амплитудой более 0,1 (относительная мощность больше 1%). Номер такой составляющей ($k_{гр}$) находится из выражения:

$$J_{k_{гр}}(k_{гр} - 1) > 0,1.$$

Аргументом функции Бесселя является индекс модуляции M , следовательно $k_{гр} - 1 = M$, откуда:

$$k_{гр} = M + 1.$$

Составляющая спектра с номером $k_{гр} + 1$ имеет относительную амплитуду менее 0,1, т. е. окажется за пределами практической ширины спектра.

Последнее выражение позволяет по индексу модуляции M оценить число спектральных линий в практической ширине спектра. Так, например, при $M = 3,2$ граничное значение $k_{гр} = 4$ (ближайшее целое число). Следовательно, в спектре такого сигнала должны быть несущая и четыре пары боковых частот. Эти результаты легко проверить по графикам бесселевых функций (рис. 2). Действительно, четвертая пара боковых имеет относительную амплитуду $J_4(3,2) = 0,16$, т. е. находится в пределах практической ширины спектра, а следующая пятая пара боковых имеет относительную амплитуду $J_5(3,2) = 0,04$, т. е. находится за пределами этой полосы. Из рисунка 3 следует, что практическая ширина спектра $2\Delta\omega^* = 2\Omega(M+1)$.



Рисунок 3 – К определению практической ширины спектра при угловой модуляции

Здесь отложены относительные амплитуды $J_k(M)$; для построения амплитудного спектра все составляющие следует умножить на $U_0 = \text{const}$.

Для ФМ $M = M_{\text{ФМ}}$. Индекс ФМ $M_{\text{ФМ}} = \Delta\omega_{\text{max}}$ и зависит от амплитуды модулирующего сигнала U_c . Поэтому практическая ширина спектра при ФМ равна:

$$2\Delta\omega^*_{\text{ФМ}} = 2\Omega(M_{\text{ФМ}} + 1)$$

и зависит как от частоты, так и от амплитуды модулирующего сигнала.

Для ЧМ $M = M_{\text{ЧМ}} = \Delta\omega_{\text{max}}/\Omega$, где $\Delta\omega_{\text{max}}$ пропорциональна амплитуде модулирующего сигнала U_c :

$$2\Delta\omega^*_{\text{ЧМ}} = 2\Omega\left(\frac{\Delta\omega_{\text{max}}}{\Omega} + 1\right) = 2\Delta\omega_{\text{max}} + 2\Omega.$$

Обычно $\Delta\omega_{\text{max}} \gg \Omega$ и $2\Delta\omega^*_{\text{ЧМ}} \cong 2\Delta\omega_{\text{max}}$, т. е. при ЧМ практическая ширина спектра зависит от амплитуды и почти не зависит от частоты модулирующего сигнала Ω . Следовательно, практическая ширина спектра ЧМ сигнала значительно меньше, чем для ФМ сигнала при тех же параметрах модуляции, что и определило широкое использование ЧМ в радиовещании и связи.

Выходная мощность передатчика с УМ на некоторой нагрузке R_H может быть найдена как сумма мощностей, отдельных составляющих спектра:

$$\begin{aligned} P_{\text{вых}} &= P(\omega_0) + P(\omega_0 + \Omega) + P(\omega_0 - \Omega) + P(\omega_0 + 2\Omega) + \dots = \\ &= \frac{U_0^2}{2R_H} [J_0^2(M) + J_1^2(M) + J_{-1}^2(M) + J_2^2(M) + \dots] = P_0. \end{aligned}$$

Здесь $U_0^2/2R_H = P_0$ – мощность гармонического (немодулированного) сигнала, а сумма в квадратных скобках, согласно свойству 4 бесселевых функций, равна единице. Следовательно, мощность передатчика с угловой модуляцией остается постоянной независимо от параметров модуляции. В этом отношении ЧМ и ФМ выгодно отличаются от АМ, для которой выходная мощность передатчика меняется в больших пределах (например, при максимальной глубине модуляции $M_{\text{АМ}} = 1$, мощность передатчика АМ меняется от нуля до $4P_0$).

В спектрах ЧМ сигналов нет низкочастотной составляющей, соответствующей исходному моделирующему сигналу. Для того чтобы восставить сигнал сообщения необходимо осуществить детектирование – процесс, обратный модуляции. Детектирование, как и модуляция, – нелинейное преобразование сигнала. Нелинейный элемент обогащает спектр выходного сигнала новыми спектральными компонентами, а фильтр выделяет низкочастотные компоненты. В качестве нелинейных элементов при детектировании можно использовать транзисторы и полупроводниковые диоды. Чаще всего используются полупроводниковые диоды, причём применяются только точечные диоды, так как плоскостные диоды имеют большую входную ёмкость.

При детектировании ЧМ сигнала напряжение на выходе частотного детектора (ЧД) должно воспроизводить закон изменения мгновенной частоты входного сигнала. Поэтому для идеального ЧД

$U_{\text{вых}}(t) = S_{\text{чд}}(t)\Delta f(t)$, где $S_{\text{чд}}$ – крутизна характеристики ЧД. При этом предполагается, что $\Delta f(t)$ и $U_{\text{вых}}(t)$ являются «медленными» функциями времени. В отличие от амплитудного детектора, для образования частот сообщения (низкочастотной компоненты) одного лишь нелинейного элемента недостаточно: нелинейность диода проявляется при изменении действующего на него напряжения, а не при изменении частоты. Поэтому для осуществления ЧМ детектирования требуются дополнительные преобразования.

Существует два класса ЧД: в одних детекторах ЧМ сигналы с помощью колебательного контура преобразуются в АМ сигналы, а потом детектируются, в других (дискриминатор, детектор отношений) – при детектировании ЧМ сигналов используется зависимость от частоты в колебательном контуре разности фаз между током и напряжением.

Основными характеристиками и параметрами ЧД являются:

- 1) семейство детекторных характеристик: $\Delta U = F(f)$ при $U_0 = \text{const}$;
- 2) крутизна детекторной характеристики: $S_{\text{чд}} = \Delta U / \Delta f$;
- 3) диапазон частот $\Delta f_{\text{лин}}$, в котором детекторная характеристика достаточно линейна;
- 4) входное сопротивление: $R_{\text{вх}} = U_0 / I_0$;

5) минимальное $U_{0\min}$ и максимальное $U_{0\max}$ значения амплитуды входного сигнала, при которых гарантируются основные качественные показатели;

6) выходное сопротивление: $R_{\text{вых}} = U_{\Omega}/I_{\Omega}$, определяемое свойствами АД;

7) нелинейные искажения выходного сигнала:

$$\gamma = \sqrt{\frac{P_{2\Omega} + P_{3\Omega} + P_{4\Omega} + \dots}{P_{\Omega}}}.$$

Рассмотрим процесс детектирования высокочастотных ЧМ сигналов на примере некоторых схем ЧД первого типа. В этих детекторах используются:

- амплитудный ограничитель (АО) ЧМ сигнала;
- избирательная линейная цепь, преобразующая частотную модуляцию в амплитудную;
- амплитудный детектор.

АО ЧМ сигнала позволяет устранять нежелательные изменения амплитуды высокочастотного колебания, возникающие вследствие воздействия помех на радиосигнал при передаче ЧМ сигналов через избирательные цепи, при относительном изменении положения передатчика и приёмника ЧМ сигнала и т. д., и представляет собой сочетание нелинейного элемента и избирательной нагрузки. В качестве линейной цепи можно использовать любую электрическую цепь, обладающую неравномерной частотной характеристикой: RL-, RC-фильтры, колебательные контуры и т. д. Наибольшее применение получили колебательные цепи.

Самой простой является схема, в которой ЧМ сигнал с несущей f_0 подаётся на колебательный контур с частотой резонанса $f_p = f_0$ (рисунок 4, а). Добротность контура выбирается таким образом, чтобы при удвоенной девиации частоты рабочий участок амплитудно-частотной характеристики был линейным. В этом случае при изменении частоты ЧМ сигнала амплитуда напряжения на контуре $U_k(t)$ будет изменяться во времени в соответствии с законом модуляции $f(t)$ (рисунок 5).

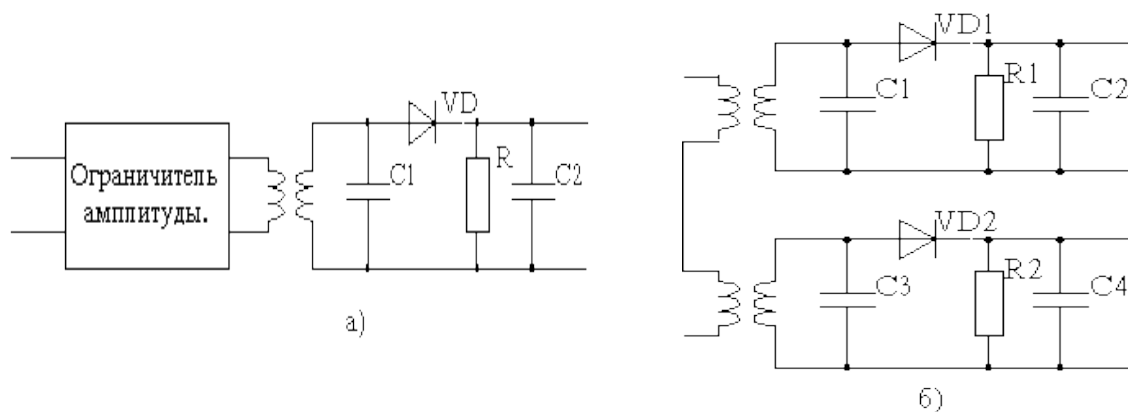


Рисунок 4 – Схемы простейшего (а) и дифференциального (б) ЧД

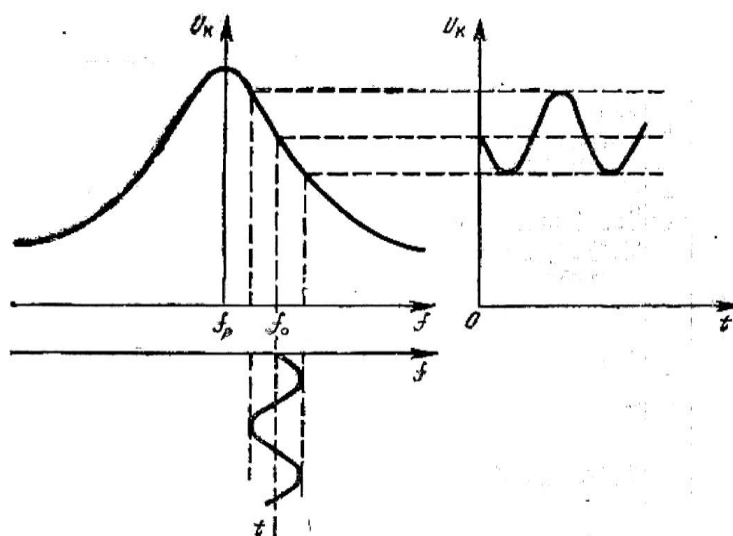


Рисунок 5 – К объяснению принципа работы простейшего ЧД

Получившийся сигнал с изменяющейся амплитудой детектируется амплитудным детектором с RC-фильтром. Недостатком этой схемы является необходимость настройки контура на частоту, отличную от несущей ЧМ сигнала. Кроме того, резонансная кривая одиночного контура имеет небольшой линейный участок на скате характеристики. Из-за нелинейности склона резонансной кривой такие детекторы имеют большие нелинейные искажения.

В некоторой степени устранить этот недостаток позволяет схема дифференциального ЧД (рисунок 4, б). ЧМ сигнал подаётся одновременно на два контура: резонансные частоты $f_{p1} \neq f_{p2}$ выбираются таким образом, чтобы несущая частота f_0 располагалась на середине линейного участка характеристики. Сигналы АД противофазны и вычитаются (отсюда и название схемы), что позволяет уменьшить нелинейные искажения.

Недостатком рассмотренных схем (рисунок 4) является зависимость выходного сигнала от уровня высокочастотного ЧМ сигнала (рисунок 6). Для устранения этого влияния применяют амплитудные ограничители.

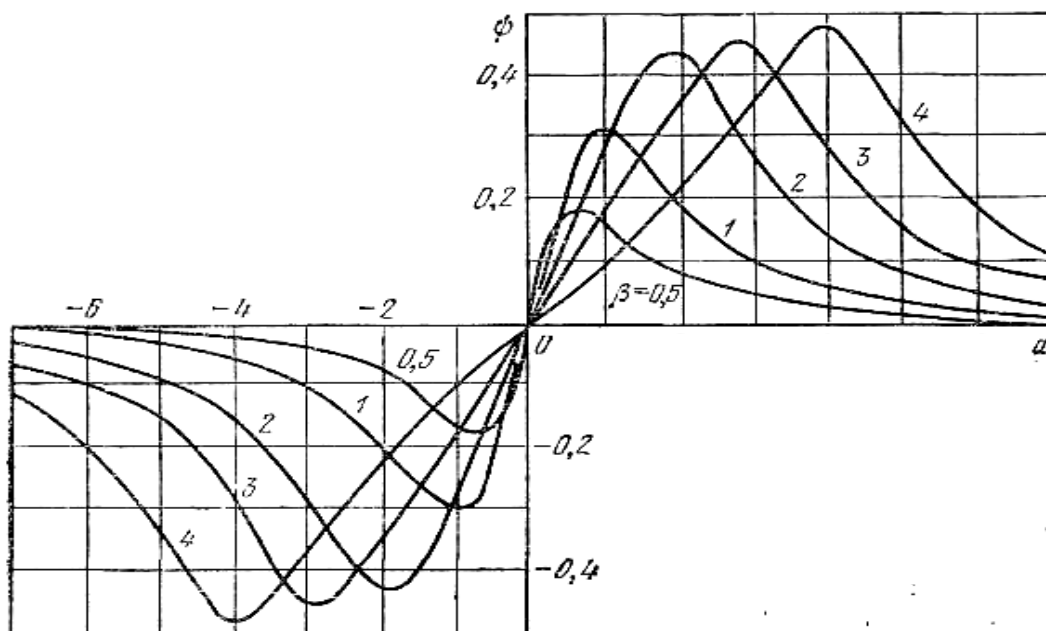


Рисунок 6 – Семейство характеристик двухконтурного ЧД

$\alpha = \frac{2\Delta f}{f_0} Q$ – относительная частота, Q – добротность контура,

$\psi = \frac{U_{\Omega}}{N}$ – относительная амплитуда напряжения на выходе ЧД,

N – постоянный коэффициент, β – коэффициент связи контуров

Схемы ЧМ детекторов второго класса весьма слабо реагируют на изменение амплитуды сигнала и поэтому не содержат ограничителя. Эти схемы довольно широко применяются в приёмниках ЧМ сигналов, в устройствах автоматической подстройки частоты генераторов и др.

В этих схемах:

- 1) девиация частоты входного ЧМ колебания преобразуется в девиацию фазы другого напряжения;
- 2) девиация фазы преобразуется в амплитудную модуляцию напряжений, приложенных к диодам;
- 3) осуществляется амплитудное детектирование.

На рисунке 7 приведены схема фазочастотного дискриминатора и график зависимости выходного напряжения от частоты.

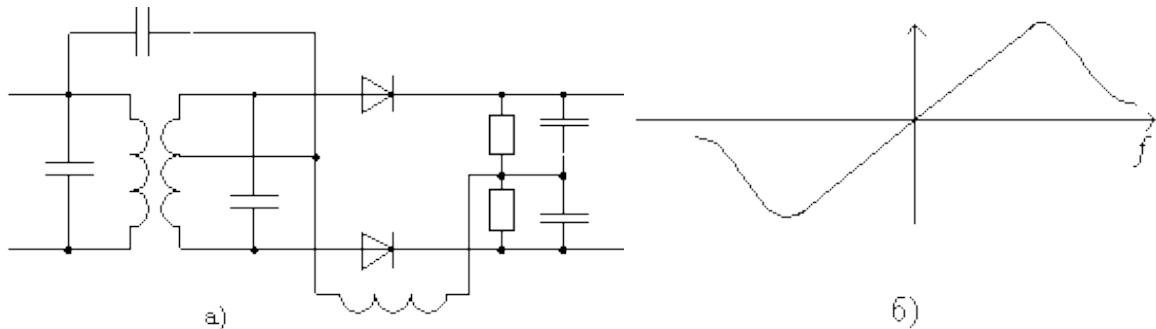


Рисунок 7 – Схема фазочастотного дискриминатора (а) и зависимость выходного напряжения от частоты (б)

5 Лабораторное задание

- 1) Проведите измерение статической модуляционной характеристики ЧМ модулятора и определите оптимальный его режим.
- 2) Определите влияние амплитуды модулирующего сигнала на форму и ширину спектра ЧМ-сигнала (при постоянной частоте модуляции).
- 3) Определите влияние частоты модуляции на форму и ширину спектра ЧМ-сигнала (при постоянной амплитуде модулирующего сигнала).
- 4) Проведите исследование формы сигнала на входе и выходе частотного модулятора.
- 5) Проведите измерение характеристики детектирования и выберите оптимальный режим работы частотного детектора.
- 6) Проведите исследование сигналов на входе модулятора и выходе ЧД в оптимальном режиме и при отклонениях от него.

6 Методические указания

6.1 Измерение статической модуляционной характеристики (СМХ) $f = \varphi(E_{\text{см}})$ производится при отсутствующем модулирующем сигнале. Последовательно устанавливая движковым потенциометром $E_{\text{см}}$ значения напряжения смещения в соответствии с данными таблицы 1, определите значения частоты модулятора f , подключив выход модулятора (гнездо КТ2) ко входу ПК, работающего в режиме анализа спектра.

Таблица 1 – Экспериментальные значения СМХ ЧМ

$E_{\text{см}}, \text{В}$					-6,5
$f, \text{кГц}$						

По данным таблицы постройте СМХ, по которой определите:

- положение рабочей точки (на середине линейного участка);
- величину $E_{\text{см опт}}$ и несущую частоту f_0 (по вертикальной оси);
- угол наклона линейного участка СМХ (тангенс этого угла соответствует коэффициенту $K_{\text{ЧМ}}$ модулятора);
- границы линейного участка ($f_{\text{min}}, f_{\text{max}}$).

Полученные данные занесите в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты расчёта параметров ЧМ

$E_{\text{см опт}}$	f_0	f_{min}	f_{max}	$K_{\text{ЧМ}}$

В случае хорошей линейности СМХ выбор несущей частоты не критичен, однако, для последующих пунктов лучше выбрать $f_0 = 12 \div 13$ кГц.

6.2 Влияние амплитуды модулирующего сигнала на спектр ЧМ (при $F_{\text{мод}} = \text{const}$).

6.2.1 Для ряда заданных значений $M_{\text{ЧМ}}$ (таблицы 3) рассчитайте амплитуды модулирующих сигналов, а затем и действующие значения U_c .

Δf_{max} находится из выражения для индекса ЧМ:

$$M_{\text{ЧМ}} = \Delta f_{\text{max}} / F_{\text{мод}} \quad U_{\text{мс}} = \Delta f_{\text{min}} / K_{\text{ЧМ}}$$

Четвёртая строка таблицы заполняется для использования вольтметра переменного напряжения, имеющего градуировку в действующих значениях $U_c = 0,707 U_{\text{мс}}$.

Таблица 3 – Влияние амплитуды модулирующего сигнала ($F_{\text{мод}} = 500$ Гц)

$M_{\text{ЧМ}}$	0	0,1	0,5	1,0	2,4	3,8
Δf_{min}						
$U_{\text{мс}}$						

U_c						
$2\Delta f^*$						

6.2.2 Ко входу модулятора (гнездо КТ 1) подключите внутренний звуковой генератор и вольтметр переменного напряжения стенда или осциллограф. Установите частоту генератора $F_{\text{мод}} = 500$ Гц.

6.2.3 Устанавливая регулятором напряжения выхода генератора последовательно значения U_c в соответствии с таблицей 3, с помощью ПК, подключённого к выходу модулятора (гнездо КТ 2) измерьте спектры ЧМ – сигнала.

На каждой спектрограмме укажите:

- условия проведения эксперимента;
- частоты отдельных составляющих спектра;
- практическую ширину спектра $2\Delta f^*$ (при определении $2\Delta f^*$ учтите только ту часть спектра, в которой амплитуды более 10% от максимальных амплитуд).

Полученные значения $2\Delta f^*$ внесите в таблицу 3.

6.3 Влияние частоты модуляции на спектр ЧМ-сигнала ($U_c = \text{const}$).

6.3.1 Сохраняя схему соединений (п. 6.2), установите значения U_c в соответствии с таблицей 3 для $M_{\text{ЧМ}} = 2,4$ и не изменяйте его в дальнейшем.

6.3.2 Последовательно устанавливая частоты модуляции в соответствии с таблицей 4, получите спектрограммы соответствующих ЧМ-сигналов. В таблицу внесите значения $2\Delta f^*$.

Таблица 4 – Влияние частоты модуляции ($U_c = \text{const}$)

$U_c = \dots\dots$ В; $f_0 = \dots\dots$ кГц					
$F_{\text{мод}}, \text{ Гц}$	50	100	250	500	1000
$2\Delta f^*, \text{ Гц}$					
$M_{\text{ЧМ}}$					

6.3.3 Заполните последнюю строку таблицы 4, используя определение $M_{\text{ЧМ}}$ и необходимые данные из таблицы 3.

6.4 Исследование формы колебаний на входе и выходе ЧМ.

6.4.1 Соедините первый вход двухлучевого осциллографа со входом модулятора (для чего отключите вольтметр, сохраняя соединение с генератором). На второй вход осциллографа подайте выходной сигнал модулятора.

6.4.2 Установите частоту модуляции $F_{\text{мод}} = 300$ Гц. Увеличивая уровень сигнала, добейтесь появления на осциллограмме выходного сигнала паразитной амплитудной модуляции. Уменьшая уровень входного сигнала, добейтесь постоянства уровня ЧМ – сигнала.

6.4.3 Установите синхронизацию осциллографа по каналу, на вход которого подан высокочастотный (выходной) сигнал. Ручками синхронизации добейтесь неподвижного изображения.

6.4.4 Подстраивая в небольших пределах частоту модуляции, добейтесь неподвижного изображения модулирующего сигнала. Иногда нужный эффект может быть достигнут небольшой подстройкой несущей частоты (ручкой СМЕЩЕНИЕ).

6.4.5 Зафиксируйте осциллограммы на входе и выходе ЧМ.

6.5 Измерение характеристики детектирования $I_0 = \varphi_2(f)$ производится при отсутствующем модулирующем сигнале ($M_{\text{ЧМ}} = 0$) путём измерения постоянной составляющей тока детектора в зависимости от изменяемой частоты входного сигнала. Для этого отключите модулирующий сигнал от входа модулятора (гнездо 1), между гнездами КТ2 и КТ3 установите перемычку. Управление частотой осуществляйте изменением смещения ($E_{\text{см}}$) в модуляторе. Измерение частоты на выходе модулятора (гнездо КТ2) производите с помощью ПК в режиме «Спектроанализатор», а тока I_0 – микроамперметром, расположенным над регулятором $E_{\text{см}}$.

6.5.1 Изменяя напряжение смещения ($E_{\text{см}}$) в соответствии с данными таблицы 5 измерьте с помощью ПК (в режиме «Спектроанализатор») частоты модулятора и, одновременно с этим, ток детектора I_0 .

Таблица 5 – Снятие статической модуляционной характеристики $f = \varphi_1(E_{\text{см}})$ и характеристики детектирования $I_0 = \varphi_2(f)$

$E_{\text{см}}, \text{ В}$	0	-0,5	-1	-1,5	-6,5
$f, \text{ кГц}$						
$I_0, \text{ мкА}$						

При заполнении таблицы 5 кроме указанных значений $E_{см}$ добавьте те значения $E_{см}$ и f , при которых I_0 принимает нулевое и экстремальные значения.

6.5.2 Повторите измерение характеристики детектирования с использованием генератора НЧ. Для этого отключите выход модулятора (КТ2) от входа частотного детектора (КТ3). Подключите выход генератора НЧ ко входу частотного детектора (КТ3). Установите амплитуду напряжения сигнала генератора НЧ, равным 1 В. Изменяя частоту сигнала генератора НЧ, определите её значение f_0 , при котором I_0 принимает нулевое значение («ноль» частотного детектора). Уменьшая и увеличивая частоту сигнала относительно f_0 , проведите измерение зависимости $I_0 = \varphi_2(f)$. Полученные значения занесите в таблицу 6.

Таблица 6 – Снятие характеристики детектирования $I_0 = \varphi_2(f)$

f , кГц				f_0		
I_0 , мкА						

6.5.3 По данным таблицы 5 и 6 постройте статическую модуляционную характеристику (СМХ) и характеристику детектирования (ХД). Из графика ХД определите значение несущей частоты f_0 , соответствующее нулевому току детектора и максимальную девиацию частоты Δf_{max} , соответствующую границе линейного участка ХД, отсчитывая от частоты f_0 . По СМХ определите напряжение смещения $E_{см 0}$, при котором несущая частота равна f_0 и максимальную амплитуду сигнала $U_{мс}$, при которой девиация частоты максимальная Δf_{max} . Полученные значения параметров занести в таблицу 7.

Таблица 7 – Оптимальный режим частотного детектора

$E_{см 0}$, В	f_0 , кГц	Δf_{max} , кГц	$U_{мс max}$, В	$U_{с max}$, В

6.5.4 Соедините выход звукового генератора с гнездом КТ1 (вход модулятора). Подключите к гнезду КТ1 вольтметр переменного напряжения. Установите на генераторе частоту сигнала $F_{мод} = 200$ Гц и действующее значение, соответствующее $U_{с max}$ (по вольтметру). Установите $E_{см} = E_{см 0}$ (из таблицы 7).

6.5.5 Отключите вольтметр от входа 1. Подключите ко входу 1 вместо вольтметра первый вход двухлучевого осциллографа, а второй его вход соедините с выходом детектора (гнездо КТ4).

6.5.6 Получив неподвижные осциллограммы, зафиксируйте их в отчёте.

Обратите внимание на «зубцы» выходной осциллограммы, связанные с работой амплитудных детекторов.

Работа детектора в неоптимальном режиме происходит вследствие выхода параметров сигнала за пределы линейного участка ХД.

6.6 Установите напряжение смещения $E_{см} = E_{см0} + 0,5В$. По графику СМХ или данным из таблицы 5 определите новое значение несущей частоты и внесите его в отчёт. Повторите измерение ХД.

6.7 Повторите п. 6.6, но при $E_{см} = E_{см0} - 0,5В$.

6.8 Восстановите прежнее значение $E_{см0}$. Увеличьте уровень модулирующего сигнала U_c в 1,5 раза (для этого на время измерения подключите к гнезду 1 вместо осциллографа вольтметр).

Повторите измерение ХД.

7 Контрольные вопросы

- 1) Дайте определение ЧМ - сигнала.
- 2) Приведите пример записи тонального ЧМ - сигнала с параметрами: $f_0 = 100$ МГц; $F_{мод} = 10$ КГц; $\Delta f_{max} = 50$ кГц.
- 3) Объясните принцип действия частотного модулятора. Какие Вам известны способы получения ЧМ - сигналов?
- 4) Дайте определение статической модуляционной характеристики и объясните её смысл.
- 5) Что такое угловая модуляция?
- 6) Как рассчитать спектр ЧМ - сигнала?
- 7) Представьте (качественно) спектр колебания:

$$u(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + 0,01 \cos \Omega t).$$
- 8) Какое отношение имеют функции Бесселя к частотной модуляции?
- 9) Сколько спектральных линий надо учесть в практической ширине спектра ЧМ при $M_{ЧМ} = 4$?
- 10) Назовите известные Вам области применения ЧМ сигналов.

- 11) Амплитуда несущего колебания и амплитуда немодулированного ЧМ сигнала это одно и то же или нет?
- 12) Амплитуда несущего колебания и амплитуда немодулированного АМ сигнала это одно и то же или нет?
- 13) Что такое $M_{\text{ЧМ}}$ и $K_{\text{ЧМ}}$?
- 14) Какие требования предъявляются к ЧМ и ЧД?
- 15) Какие функции выполняют ЧМ и ЧД?
- 16) Как работает частотный детектор?
- 17) Где применяется частотная модуляция?
- 18) Какое отношение имеет функция Бесселя к спектру ЧМ сигнала?
- 19) Что такое оптимальный режим ЧД?